

На правах рукописи

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Dinh Hoa', written over a horizontal line.

НГУЕН ДИНЬ ХОА

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ РИСКА ДЛЯ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОЦЕНКИ
РАБОТОСПОСОБНОСТИ БАЛОЧНЫХ СИСТЕМ ИЗ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА,
ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В МОСТОСТРОЕНИИ**

Специальность 05.23.17 – Строительная механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Воронежский государственный архитектурно-строительный университет.

Научный руководитель: Заслуженный работник высшей школы РФ
доктор технических наук, профессор
Сафронов Владимир Сергеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Леденёв Виктор Васильевич

кандидат технических наук, доцент
Рукин Юрий Борисович

Ведущая организация: Воронежский филиал ОАО «ГипродорНИИ»,
г. Воронеж

Защита диссертации состоится 25 июня 2010 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.033.01 при Воронежском государственном архитектурно-строительном университете по адресу: 394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84, аудитория 3220, тел. (факс): (4732) 71-54-30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского государственного архитектурно-строительного университета.

Автореферат разослан 25 мая 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Власов В. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Транспортные сооружения, которые строятся и эксплуатируются на федеральных, региональных и городских автодорогах, а также на внутривозвездских и прилегающих к ним территориях промышленных предприятий, относятся к элементам инфраструктуры повышенной ответственности, так как при снижении эксплуатационной надежности ниже минимального уровня в них могут происходить аварии с человеческими жертвами.

На территории Вьетнама с плотной застройкой и густой транспортной системой с многочисленными мостовыми сооружениями через реки, овраги, автомобильные и железные дороги, также как и во многих субъектах Российской Федерации эксплуатируется большое количество мостовых сооружений с пролетными строениями из железобетона, построенных много лет назад для пропуска регламентируемых действующими тогда нормативными документами временных нагрузок. При существующей в настоящее время тенденции роста интенсивности и масс автомобилей происходит моральное старение мостов и увеличивается риск разрушения несущих конструкций при эксплуатации.

Дополнительным неблагоприятным фактором является возникновение дефектов и повреждений в недостаточно защищенных от атмосферных воздействий несущих элементах из железобетона при длительной эксплуатации, которые приводят к снижению их несущей способности и повышению риска разрушения при возникновении экстремальных усилий при высоких уровнях загрузки. В России железобетонные конструкции наряду с используемыми в зимнее время агрессивными смесями подвергаются воздействию попеременного замораживания и оттаивания, во Вьетнаме деструктивное влияние на железобетонные конструкции оказывает повышенная влажность.

Определение риска возникновения аварийной ситуации в несущих элементах мостового сооружения связано с учетом разброса прочностных характеристик материалов и флуктуации действующих нагрузок на основе достижений теории риска и теории надежности строительных конструкций. Поэтому актуальной становится задача оценки вероятности появления катастрофических состояний несущих конструкций мостов с учетом флуктуации прочностных характеристик материалов и действующих постоянных и временных нагрузок.

В инженерной практике вопрос об оценке вероятности (риска) возникновения катастрофических состояний несущих элементов транспортных сооружений может возникать при эксплуатации мостовых сооружений с ослабленными несущими элементами или установлении безопасных режимов проезда сверхпроектных нагрузок.

Основную сложность при определении рисков представляет вероятностный нелинейный пространственный расчёт усилий в конструкции при близких к предельным воздействиям, который для железобетонных балочных конструкций с дефектами и повреждениями является трудоёмкой задачей. В связи с этим актуальной является задача разработки методики применения распространенных в инженерной практике вычислительных комплексов типа SCAD, LIRA, MicroFE, SERIAL, ETAP и др. применительно к используемым в мостостроении балочным пролётным строениям из железобетона.

В настоящей работе на основе положений теории риска разрабатывается методика количественной оценки вероятности возникновения катастрофических состояний в нормальных и наклонных сечениях применяемых в мостостроении балочных систем из железобетона при совместном действии постоянных и временных нагрузок с учетом разброса прочностных характеристик материалов, действующих нагрузок и наличия дефектов и повреждений. При этом существенным является как величина, так и расположение дефектов и повреждений на конструкции.

Целью диссертационной работы является разработка методик, алгоритмов и программ количественной оценки вероятности возникновения предельных и катастрофических состояний в применяемых в мостостроении балочных системах из железобетона при совместном действии постоянных и временных нагрузок с учетом снижения несущей способности отдельных балок системы при наличии дефектов и повреждений.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- разработаны новая методика, алгоритм и программа количественной оценки риска возникновения предельных и катастрофических состояний применяемых в мостостроении систем железобетонных балок в эксплуатационном режиме при наличии в них дефектов и повреждений;
- разработаны методика, алгоритм и программа количественной оценки риска возникновения катастрофического состояния в нормальных сечениях железобетонных балок при произвольных законах распределения прочностных характеристик материалов и действующих нагрузок;
- впервые получены данные о влиянии разброса прочностных характеристик материалов расчета на риски возникновения катастрофических состояний в нормальных сечениях железобетонных балок;
- разработаны новая методика, алгоритм и программа количественной оценки риска возникновения катастрофического состояния в наклонных сечениях железобетонных балок для нормального распределения прочностных характеристик материалов и действующих нагрузок;
- впервые получены данные о влиянии разброса прочностных характеристик материалов на риски возникновения катастрофических состояний в наклонных сечениях железобетонных балок;
- в оригинальной постановке решена с позиций теории риска задача

оптимизации размеров и армирования изгибаемой железобетонной балки;

- разработаны новая методика, алгоритм и программа количественной оценки риска возникновения предельного состояния по трещиностойкости в нормальных сечениях железобетонных балок с предварительно напряженной арматурой для нормального распределения прочностных характеристик материалов и разброса потерь предварительного напряжения;

- получены количественные показатели риска возникновения катастрофических и предельных состояний в несущих элементах разрезных железобетонных балочных пролётных строений автодорожных мостов при совместном действии постоянных и сверхпроектных временных нагрузок с учетом и без учета дефектов и повреждений.

Основными задачами диссертационной работы являются:

- разработка методики, алгоритма и программы количественной оценки риска возникновения предельных и катастрофических состояний применяемых в мостостроении систем железобетонных балок в эксплуатационном режиме с учетом снижения несущей способности во время эксплуатации при возникновении дефектов и повреждений;

- разработка методики, алгоритма и программы количественной оценки риска возникновения катастрофического состояния в нормальных сечениях железобетонных балок при произвольных законах распределения прочностных характеристик материалов и действующих нагрузок;

- численные исследования влияния разброса прочностных характеристик материалов на риски возникновения катастрофических состояний в нормальных сечениях железобетонных балок;

- разработка методики, алгоритма и программы количественной оценки риска возникновения катастрофического состояния в наклонных сечениях железобетонных балок для нормального распределения прочностных характеристик материалов и действующих нагрузок;

- численные исследования влияния разброса прочностных характеристик материалов на риски возникновения катастрофических состояний в наклонных сечениях железобетонных балок;

- формулировка и решение с позиций теории риска задача оптимизации размеров и армирования изгибаемой железобетонной балки с использованием в качестве целевой функции полной стоимости балки с учетом затрат на восстановление при приближении к предельному состоянию;

- разработка методики, алгоритма и программы количественной оценки риска возникновения предельного состояния по трещиностойкости в нормальных сечениях железобетонных балок с предварительно напряженной арматурой для нормального распределения прочностных характеристик материалов и разброса потерь предварительного напряжения;

- численные исследования количественных показателей риска возникновения катастрофических и предельных состояний в несущих

элементах железобетонных балочных пролётных строений автодорожных мостов при совместном действии постоянных и сверхпроектных временных нагрузок с учетом и без учета дефектов и повреждений.

Достоверность научных положений и результатов, сформулированных в диссертации. Основные принципы разработанных методик основаны на непротиворечивых положениях строительной механики и теории риска. Сходимость предлагаемых алгоритмов проверена сопоставлением результатов на ряде расчетных примеров с данными других авторов.

Практическая ценность работы заключается в создании на базе разработанных алгоритмов программ расчёта балочных пролётных строений автодорожных мостов с учетом разброса прочностных характеристик материалов и действующих нагрузок, а также с учётом различных дефектов и повреждений. Программы апробированы и могут быть рекомендованы для практического внедрения.

На защиту выносятся:

– методика, алгоритм и программа количественной оценки риска возникновения предельных и катастрофических состояний применяемых в мостостроении систем железобетонных балок в эксплуатационном режиме с учетом снижения несущей способности во время эксплуатации при возникновении дефектов и повреждений;

– методика, алгоритма и программы количественной оценки риска возникновения катастрофического состояния в нормальных сечениях железобетонных балок при произвольных законах распределения прочностных характеристик материалов и действующих нагрузок;

– разработка методики, алгоритма и программы количественной оценки риска возникновения катастрофического состояния в наклонных сечениях железобетонных балок для нормального распределения прочностных характеристик материалов и действующих нагрузок;

– новое решение с позиций теории риска задачи оптимизации размеров и армирования изгибаемой железобетонной балки с использованием в качестве целевой функции полной стоимости балки с учетом затрат на восстановление при приближении к предельному состоянию;

– методика, алгоритм и программа количественной оценки риска возникновения предельного состояния по трещиностойкости в нормальных сечениях железобетонных балок с предварительно напряженной арматурой для нормального распределения прочностных характеристик материалов и разброса потерь предварительного напряжения.

Апробация работы проведена путём представления и обсуждения докладов на 63-65 научных конференциях ВГАСУ (Воронеж, 2008-2010 гг.), а также на научно–практических конференциях по проблемам прочности, живучести и надежности строящихся, эксплуатируемых и реконструируемых зданий и сооружений промышленного и гражданского назначения и мостов, проводимых в ВГАСУ (Воронеж, 2008-2010 гг.). Материалы диссертации

представлены на международном конгрессе «Наука и инновации в строительстве SIB – 2008» в ВГАСУ (Воронеж, 2008 г.), IX международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии» в Тульском техническом университете (Тула, 2008 г.), на международной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» в Воронежском государственном университете (Воронеж, 2009 г.).

Публикации: основное содержание диссертационной работы изложено в 5 публикациях, в том числе одна статья опубликована в издании, входящем в перечень, определенный ВАК РФ.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Диссертация содержит 161 страницу, в том числе 106 страниц машинописного текста, список литературы из 130 наименований использованных источников, 80 рисунков, 23 таблицы и 1 приложение с двумя актами внедрения разработанных методик и программ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы диссертационной работы, определяются цели и задачи исследований по разработке методики количественной оценки вероятности возникновения предельных и катастрофических состояний в применяемых в мостостроении балочных системах из железобетона при совместном действии постоянных и временных нагрузок с учетом снижения несущей способности отдельных балок системы. Отмечаются научная новизна выполненных исследований и практическая ценность диссертационной работы.

В первой главе рассматривается важность рассматриваемой темы исследований для условий Вьетнама, где в настоящее время наблюдается прирост промышленного производства и бурное развитие транспортных коммуникаций. По статистическим данным в 2005 году во Вьетнаме эксплуатировалось 34 тысячи мостовых сооружений с общей длиной около 607 км. Более 70 % из них выполнено из железобетона, в том числе мостовые сооружения с балочными пролетными строениями являются наиболее распространенными. При существующей в настоящее время тенденции роста интенсивности и масс автомобилей происходит их моральное старение, возникают неисправности в несущих железобетонных элементах, которые приводят к снижению их несущей способности и повышению риска разрушения несущих конструкций при эксплуатации.

Далее в главе приведён краткий обзор исследований по применению теории надежности и теории риска для вероятностного расчета несущих строительных конструкций. Большой вклад в развитие метода предельных состояний для прочностных расчетов внесли работы Н.С. Стрелецкого, В.А.

Балдина и др. Применение вероятностных методов к расчетам строительных конструкций на надежность было развито исследованиями А.Р. Ржаницина, В.В. Болотина, Б.И. Снарскиса, А.Я. Дривинга, Н.Н. Складнева, Ю.Д. Сухова, С.А. Тимашева, В.Д. Райзера, Г. Шпете и др. Это же научное направление развивали О.В. Лужин, Л.И. Иосилевский, В.А. Клевцов, М.Б. Краковский, А.П. Кудзис, А.С. Лычев, Ю.А. Павлов, В.П. Чирков и др. На основе теории надежности сформировалось новое научное направление, получившее название теории риска по аналогии с развиваемым в экономических исследованиях. Оно сначала было использовано для расчета зданий и сооружений на сейсмостойкость в работах С.В. Медведева, Г.А. Лямзина, Aziz T. S., Chartwood R. G., L. Esteva, Neville C Donovan и J.H. Wiggins. В дальнейшем теория риска получила развитие в публикациях А.П. Синицына, А.В. Перельмутера, Т. Бачкаи, Д. Месена, Д. Мико, Г. Шпете, S. Levine, M.T. Todinov и др. Обзор исследований по применению теории надежности и теории риска для вероятностного расчета несущих строительных конструкций показывает, что количество публикаций, посвященных разработке основанных на положениях теории риска методик прочностных расчетов, ограничено.

Далее в главе приводится краткое описание методов пространственного расчета мостовых балочных систем из железобетона. Затронуты работы Х. Хомберга, И. Вейнстмейстера, В.Г. Донченко, А.В. Александрова, Б.Е. Улицкого, А.И.Ананьина, Л.В. Семенца и других. В настоящее время для целей расчета в инженерной практике нашел применение метод конечных элементов (МКЭ) и разработанные на его основе программные комплексы SCAD, ЛИРА, MicroFE, STARK ES, SAP2000, NASTRAN и другие. К сожалению, большинство из известных вычислительных программ, реализующих МКЭ, не ориентированы на конструктивные схемы мостовых конструкций и особенности моделирования временных нагрузок от автомобилей. Этого недостатка лишен разработанный сотрудниками кафедры строительной механики ВГАСУ программный комплекс MGBD2-SERIAL.

Затем описывается постановка диссертационных исследований. Рассматриваются однопролетные разрезные балочные пролетные строения (рис. 1), выполненные из железобетонных тавровых балок, объединенных между собой только по плите проезжей части (без поперечных диафрагм).

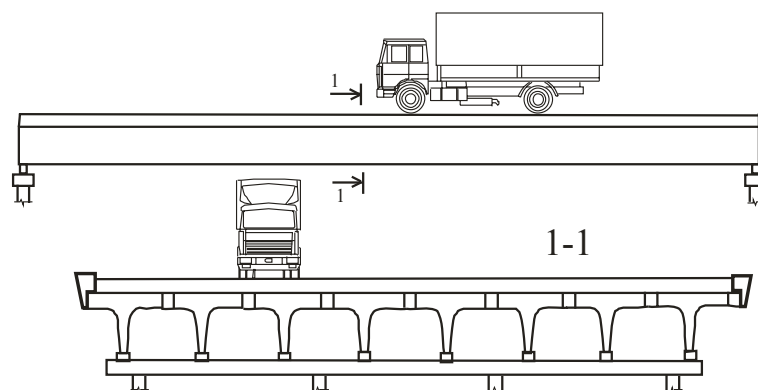


Рис. 1. Балочная система из железобетона

В соответствии с теорией риска вероятность P_F катастрофического состояния несущей конструкции в целом или его отдельной части равна:

$$P_F = P_f \cdot P_{F/f}, \quad (1)$$

где P_f - вероятность возникновения первого предельного состояния в наиболее нагруженном элементе, $P_{F/f}$ - вероятность возникновения катастрофического состояний в конструкции в случае реализации первого предельного состояния.

Для рассматриваемых балочных систем из « n » объединённых между собой балок возможно возникновение нескольких предельных состояний ($ПС_i$, где $i=1, 2 \dots m < 2n$) в нормальном вблизи середины пролета или наклонном вблизи опоры сечениях каждой из балок, пока не наступает катастрофическое состояние пролетного строения в целом или его части. Примем в качестве P_f максимальную вероятность возникновения предельного состояния в наиболее нагруженном элементе пролетного строения:

$$P_f = \max P_i(ПС_i), \quad (i = 1, 2 \dots 2n). \quad (2)$$

Вероятность $P_{F/f}$ возникновения катастрофического состояния в конструкции в случае реализации первого предельного состояния вычислим в соответствии с теоремой умножения нескольких зависимых случайных событий таким образом:

$$P_{F/f} = P\{ПС_2 / ПС_1\} \cdot P\{ПС_3 / ПС_1, ПС_2\} \cdot \dots \cdot P\{ПС_m / ПС_1, ПС_2 \dots ПС_{m-1}\}, \quad (3)$$

где $P(ПС_m / ПС_1, ПС_2 \dots ПС_{m-1})$ – максимальная вероятность реализации m -ого предельного состояния, вычисленную в предположении, что $m-1$ предельных состояний $ПС_1, ПС_2 \dots ПС_{m-1}$ уже произошли. Число m выбирается из условия, когда последний сомножитель в выражении (3) не достигнет допустимого значения P_0 , близкого единице.

При приближении к катастрофическому состоянию одного из нормальных или наклонных сечений их жесткостные параметры резко снижаются и вероятность возникновения следующего предельного состояния вычисляется для системы с измененными параметрами. Для исключения нормального сечения в середине пролета балки применяется используемый в ПК MGBD2-SERIAL коэффициент ослабления изгибной жесткости нормального сечения, а для исключения наклонного сечения – коэффициент ослабления сдвиговой жесткости наклонного сечения. Численные значения этих коэффициентов при реализации описанной методики расчета принимались в пределах 0,03...0,05.

Для пролетных строений, состоящих из произвольного набора балок введем упрощающее предположение о том, что прочностные характеристики материалов и действующие постоянные и временные нагрузки подчиняются нормальным законам распределения. В этом случае вероятность разрушения выражается через плотность распределения резерва прочности с помощью функцией Лапласа по формуле:

$$P_f = 0,5 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^{\beta} e^{-\frac{u^2}{2}} du, \quad (4)$$

где β – характеристика безопасности, равная отношению среднего значения резерва прочности к его среднеквадратическому отклонению.

Для удобства представления численных результатов использован логарифмический показатель риска, который вычислялся из выражения:

$$\rho_f = \lg\left(\frac{1}{P_f}\right). \quad (5)$$

В конце первой главы предлагается алгоритм расчета вероятности разрушения балочной системы и приводится краткое описание задач, решаемых по рассматриваемой проблеме.

Во второй главе описываются методика, алгоритм и программа для определения вероятности разрушения (риска) P_F в нормальном сечении изолированной однопролётной железобетонной балки с обычным армированием. В этом случае вероятность разрушения совпадает с вероятностью возникновения предельного состояния P_f по прочности нормального сечения, так как можно принять $P_{F/f}=1$.

Методика разработана в двух вариантах задания разброса прочностных характеристик материалов и нагрузок: по нормальному закону и при отклонениях от него в сторону положительной или отрицательной асимметрии. Для расчетов предельных усилий применяется нелинейный деформационный расчет на основе нелинейных диаграмм деформирования бетона и арматуры.

Расчетный алгоритм определения риска разработан на основе метода статистических испытаний, при котором выполняется многократное вычисление предельных и максимальных изгибающих моментов в нормальном сечении балки при разных случайных прочностных характеристиках бетона и арматуры и значениях нагрузки. Выполненные численные исследования показали, что распределения предельных изгибающих моментов для балок с Гауссовскими флуктуациями прочности и нелинейными диаграммами деформирования близки к нормальному закону. Поэтому вероятность разрушения балки определялась по формуле (4).

На рис. 2 представлены полученные с помощью реализующей описанный алгоритм расчетной программы графики зависимости показателя риска ρ_f разрушения нормальных сечений изгибаемых балок из бетона класса В20 с арматурой А-II от коэффициентов вариации прочности бетона ν_b и арматуры ν_s .

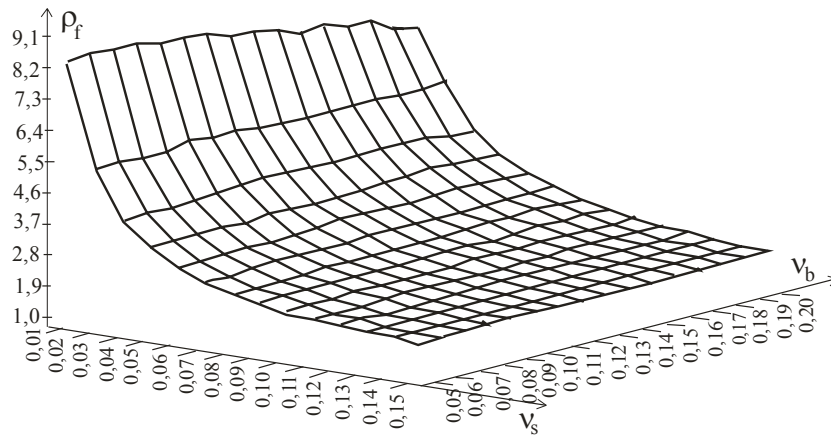


Рис. 2. Зависимость показателя риска ρ_f от значений v_b и v_s

Из графиков видно, что разброс прочности арматуры играет важную роль при оценке величины риска, а разброс прочности бетона не является существенным. Аналогичные результаты получены и для других сочетаний классов бетона и арматуры.

Для случаев отклонений распределений нагрузок от нормального закона вероятности разрушения нормальных сечений балок выполнялись непосредственно по заданным распределениям прочности и нагрузок по формуле:

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} p_F(F) \cdot P_R(F) \cdot dF, \quad (6)$$

где $p_F(F)$ – плотности вероятности распределения нагрузки; $P_R(F)$ – функция распределения прочности R , но с аргументом нагрузки F .

С использованием формулы (6) выполнены численные исследования риска разрушения нормальных сечений при задании прочностных характеристик по нормальному закону, а для нагрузок – по нормальному, логнормальному законам и обобщенному бета - распределению. Сопоставление значений риска для разных законов распределения нагрузки (рис. 3) показывает, что при одних и тех же величинах математического ожидания и стандарта для нагрузки риск разрушения будет больше для случая, когда нагрузки заданы обобщенным бета - распределением с отрицательной симметрией.

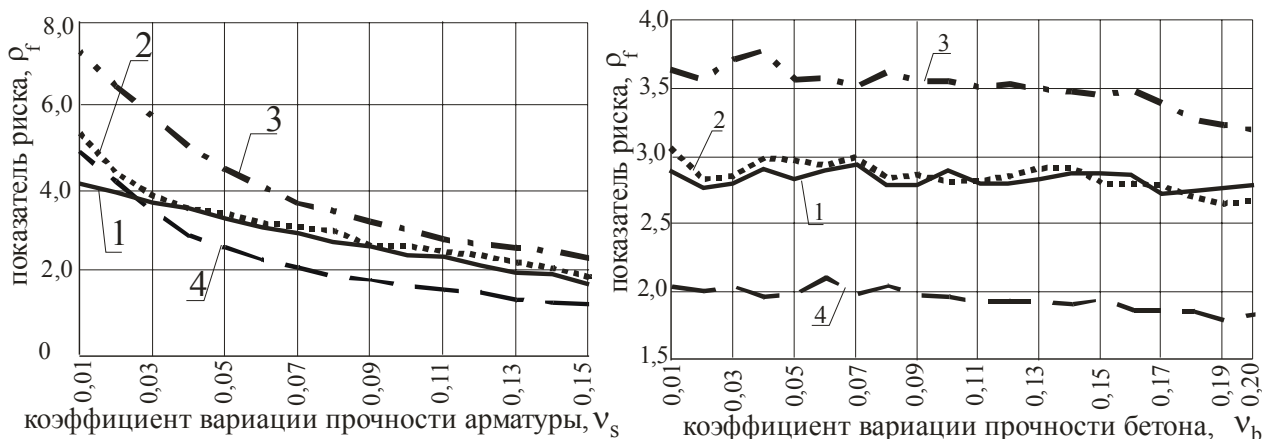


Рис. 3. Оценка влияния риска от коэффициентов прочности арматуры и бетона:
 1 – нормальный закон, 2 – логнормальный закон, 3 – обобщенный бета-закон с положительной асимметрией, 4 – обобщенный бета-закон с отрицательной асимметрией

В конце второй главы приводится решение задачи оптимизации железобетонной балки с позиций теории риска. Понятие риска r_f здесь трактуется как произведение вероятности разрушения P_f и ожидаемых последствий отказа V_f :

$$r_f = P_f \cdot V_f, \quad (7)$$

которое используется для оптимизации опалубочных размеров и армирования железобетонных балок. В качестве целевой функции при оптимизации принята полная стоимость балки C_{Π} , включающую наряду со стоимостью ее изготовления и монтажа, также и ущерб, который возникает при возникновении предельного состояния в нормальном сечении:

$$\min \{ C_{\Pi} = C_0(P_f) + C_y(P_f) \}, \quad (8)$$

где $C_0(P_f)$ - стоимость изготовления балки, $C_y(P_f)$ - экономические последствия (ущерб), которые считаются функцией вероятности возникновения катастрофического состояния и задаются в условных единицах пропорционально вероятности разрушения:

$$C_y(P_f) = V_f \cdot P_f, \quad (9)$$

где V_f – постоянная ущерб в условных единицах.

В описанной постановке полная задача оптимизации балки решается как определение оптимального значения коэффициента запаса прочности, соответствующего вероятности отказа P_f для минимума полной стоимости C_{Π} с учетом ущерба при разрушении. Алгоритм расчета параметров балки построен на основе направленного поиска. Численные исследования выполнялись с помощью составленной на основе предложенного алгоритма вычислительной программы. Расчеты выполнены для Российских и Вьетнамских стоимостных данных арматуры и бетона. Учтено, что стоимость бетона во Вьетнаме почти в 2 раза меньше, чем в России, а цены на арматуру в России и во Вьетнаме близки. Поэтому оптимальная высота поперечного сечения изготовленной во

Вьетнаме балки больше соответствующей высоты поперечного сечения балки, изготовленной в России.

Для оценки эффективности применения повышенных классов материалов в современном строительстве были выполнено оптимизационное проектирование балок из бетона и арматуры разных классов. Результаты численных исследований показывают явные тенденции уменьшения полных стоимостей балок одинаковой надежности при использовании бетона и арматуры более высоких классов.

Третья глава посвящена разработке методики расчета риска предельных состояний для нормальных сечений предварительно напряженных балок. Наряду с возможностью разрушения по нормальному сечению по недостатку прочности рассматриваются предельные состояния по трещиностойкости и предельному раскрытию трещин.

Вероятностный расчет на прочность строится на основе обобщения нелинейного деформационного алгоритма, описанного во второй главе. Вычислительная программа, составленная по этому алгоритму, использована для выявления наиболее значимых факторов влияния. Численные исследования показали, что разброс прочности бетона, ненапрягаемой арматуры и контролируемых усилий предварительно натяжения оказывает незначительное влияние на риск разрушения, а флуктуации прочностных характеристик напрягаемой арматуры и нагрузок весьма значимы.

При оценке риска образования трещин в нормальных к продольной оси элемента сечениях рассматривается условие превышения изгибающего момента $M_{вн}$ от внешней нагрузки предельного значения M_{crc} :

$$M_{вн} > M_{crc}. \quad (10)$$

Предельный изгибающий момент M_{crc} определяется по деформационной модели с учетом сопротивления бетона растяжению и разброса усилий предварительного натяжения и их потерь. Флуктуации этих величин приняты по нормальному закону. Разработанная для ЭВМ программа позволила оценить влияние различных факторов.

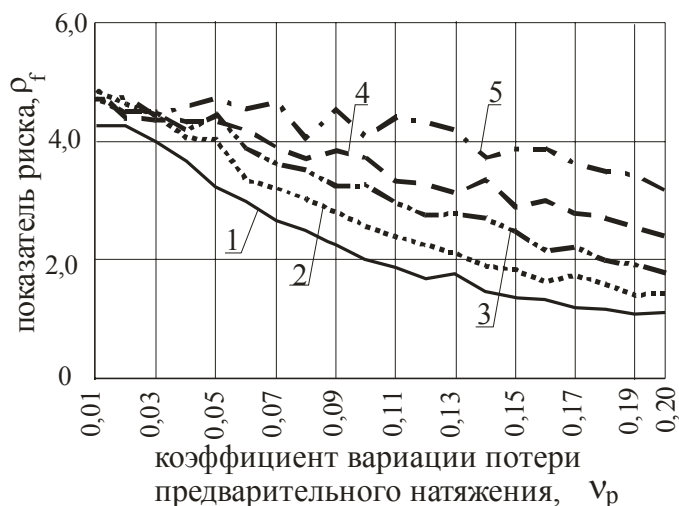


Рис. 4. Оценка показателя риска для разных процентов потерь предварительного натяжения: 1 – 30 %, 2 – 25 %, 3 – 20 %, 4 – 15 %, 5 – 10 %

На рис. 4 показано влияние разброса V_P потерь предварительного натяжения на

величину риска образования трещин в нормальных сечениях для разных случаев величины потерь предварительного натяжения.

Результаты расчетов риска трещинообразования в нормальных сечениях предварительно напряженных балок показали, что изменчивость прочности арматуры и бетона практически не влияет на величину риска, а флуктуации нагрузок и потерь усилий предварительного натяжения показывают существенное влияние на риск трещинообразования в балках.

В четвёртой главе описывается методика расчета риска разрушения наклонных сечений железобетонных балок. Проверка прочности в наклонных сечениях сводится к оценке возможности появления трех следующих предельных состояний: разрушению бетонной полосы между двумя наклонными сечениями, исчерпанию несущей способности наклонных сечений от действия поперечных сил, а также от действия изгибающих моментов. При этом прочностные характеристики бетона и арматуры, а также действующие нагрузки являются случайными. Армирование наклонных сечений балок считается заданным.

В качестве критериев для оценки риска разрушения используются значения резервов прочности по поперечной силе в бетонной полосе (ΔQ_b), поперечной силе (ΔQ) и изгибающему моменту (ΔM) в наклонных сечениях.

Разработаны вычислительные алгоритмы расчета риска разрушения наклонного сечения для трех возможных катастрофических состояний: разрушения бетонной полосы между трещинами $P_f(Q_b)$, разрушения наклонного сечения от действия поперечной силы $P_f(Q)$ и разрушения при воздействии изгибающих моментов $P_f(M)$. Расчёт общей вероятности разрушения наклонного сечения, который сводится к оценке возникновения хотя бы одного из рассмотренных трёх предельных состояний, выполняется по формуле:

$$P_f(Q_b * Q * M) = 1 - (1 - P_f(Q_b)) \cdot (1 - P_f(Q)) \cdot (1 - P_f(M)) \quad (11)$$

Результаты расчетов по разработанным алгоритмам для балки прямоугольного сечения без отгибов приведены на рис. 5.

Предельное состояние в наклонном сечении балок без отгибов под действием поперечной силы оказалось самым опасным из трех рассмотренных предельных состояний.

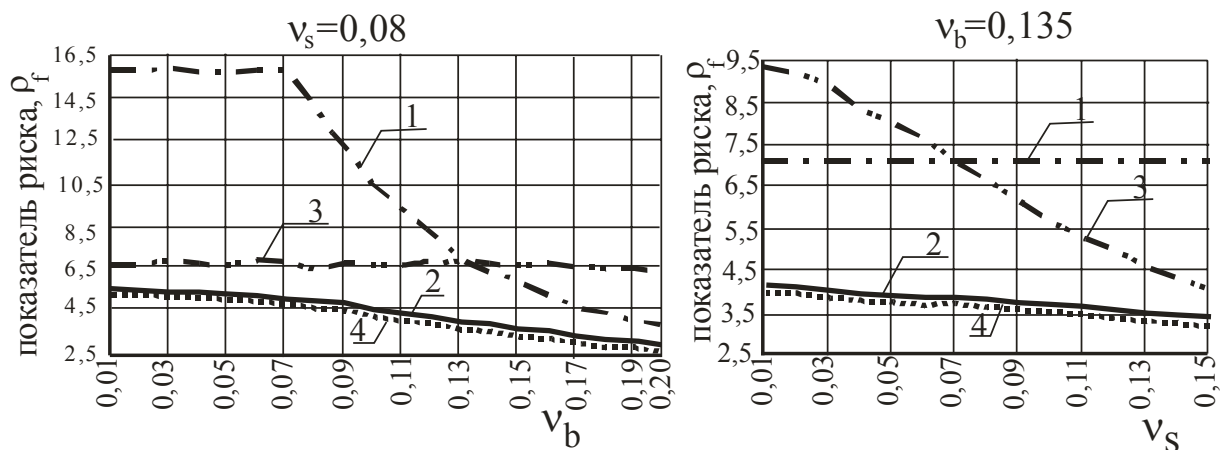


Рис. 5. Зависимости показателей риска ρ_f от разброса прочности бетона v_b (слева) и арматуры v_s (справа) для балок без отгигов:
 1 – $P_f(Q_b)$, 2 – $P_f(Q)$, 3 – $P_f(M)$, 4 – $P_f(Q_b*Q*M)$

Для балок с отогнутыми стержнями продольной арматуры риск разрушения наклонных сечений оказывается наиболее опасным при воздействии изгибающих моментов (рис. 6).

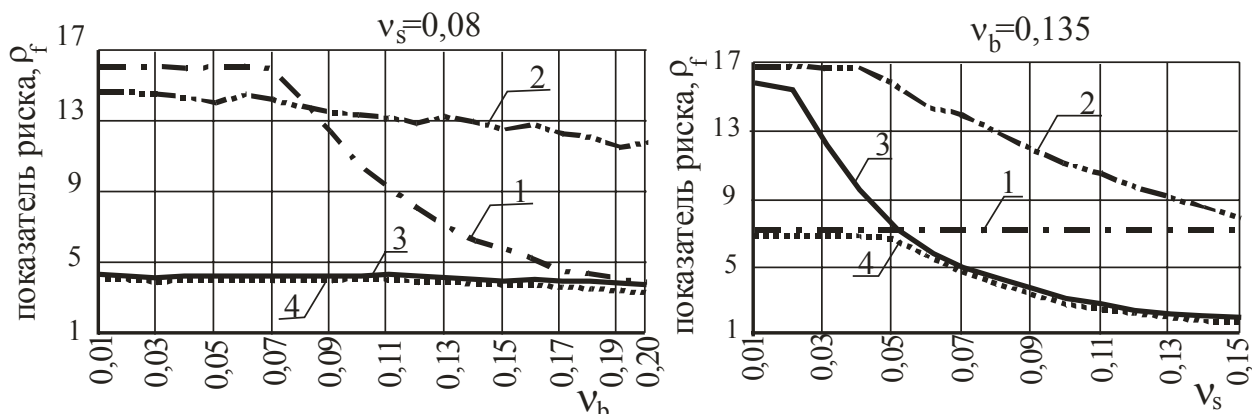


Рис. 6. Зависимости показателей риска ρ_f от разброса прочности бетона v_b (слева) и арматуры v_s (справа) для балок с отгибами:
 1 – $P(Q_b)$, 2 – $P(Q)$, 3 – $P(M)$, 4 – $P(Q_b*Q*M)$

Выполнены исследования устойчивости и сходимости результатов расчета, выполняемых по методу статистических испытаний. Численные исследования расчетов при различных объемах N выборок случайных чисел показали, что уже при $N=50$ расчет дает практически окончательное среднее значение показателя риска ρ_f (рис. 7). Совершенно по-другому выглядит график для стандарта σ_{ρ_f} и коэффициента вариации v_{ρ_f} показателя риска. Стабильность достигается при достаточно большом значении $N=1000$ (рис. 8).

Результаты исследований позволяют выбрать оптимальный размер выборки N для расчетов риска в зависимости от трудоемкости расчета и требуемой точности получаемых результатов.

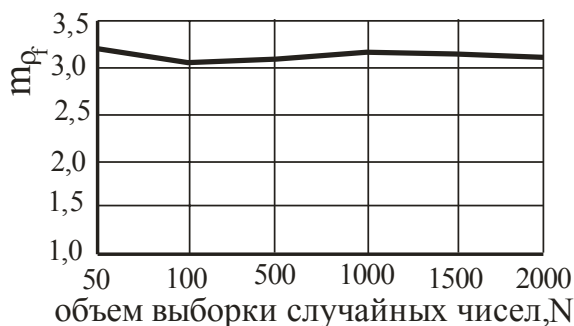


Рис. 7. Зависимость среднего значения риска ρ_f от объема выборки N

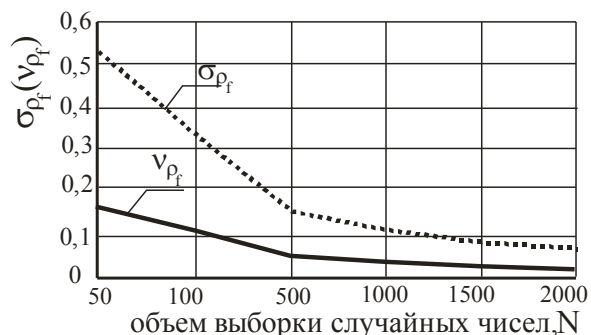


Рис. 8. Зависимости стандарта σ_{ρ_f} и коэффициента вариации V_{ρ_f} показателя риска ρ_f от N

Пятая глава посвящена описанию программной реализации методики вероятностного расчета для системы железобетонных балок. Приведенный в первой главе диссертации алгоритм реализован в выполненном в полуавтоматическом режиме функционирования программном комплексе RISK-RBS, разработанном на основе расчетных модулей комплекса SERIAL-MGBD2, программного комплекса MATHCAD и EXCEL VBA.

Далее в главе приведены материалы по апробации разработанного вычисленного комплекса RISK-RBS на тестовых примерах расчета. Сначала приведено сопоставление результатов расчета риска разрушения железобетонного пролетного строения с приведенными в кандидатской диссертации М.В. Косенко материалами вероятностных расчетов *живучести* этого же пролетного строения, выполненными по программе MGBD3-SERIALN. Анализ численных результатов показал, что обе программы приводят к практически одинаковым вероятностям первого предельного состояния в нормальном сечении крайней балки Б1, равным $P_{1f} \approx 10^{-3}$. После достижения в среднем сечении балки Б1 предельного состояния нормальное сечение в балке Б2 разрушается с разными вероятностями P_{2f} . Это различие можно считать несущественным, и может быть объяснено погрешностями метода статистических испытаний.

В качестве примеров применения разработанной в диссертации методики выполнена оценка риска разрушения пролетных строений запроектированных на действие временных нагрузок А11 и НК-80 автодорожного моста через балку Сурки в Липецкой области, для которого при натурных испытаниях получены подробные данные. Для крайних пролетов моста, состоящих из 8 тавровых балок с обычным армированием, выполнена оценка риска разрушения от проезда сверхпроектных нагрузок, а для средних пролетов с 6 предварительно напряженными балками дана оценка риска возникновения трещин.

В диссертации с помощью разработанной программы RISK-RBS выполнены расчеты риска разрушения крайнего пролета при воздействии временной нагрузки А14. Результаты расчетов представлены в двух вариантах ослаблений трех главных балок Б2, Б3 и Б4:

- Вариант А. В средних сечениях балок имеются повреждения, снижающие несущую способность нормальных сечений на 30 %.

- Вариант Б. В приопорных сечениях балок имеются повреждения, снижающие несущую способность наклонных сечений на 30 %.

Приведенные в таблице результаты расчетов для варианта А показывают последовательность развития разрушающего процесса. На первом этапе нормальное сечение балки Б4 имеет наименьший показатель риска ее разрушения ($\rho_f^M=2,52$), который соответствует наибольшему риску разрушения ($P_f^M=10^{-2,52}$). На втором этапе среднее сечение этой балки исключается из расчетной схемы. Наименьшее значение на втором этапе расчета имеет логарифмический показатель риска разрушения нормального сечения балки Б3 ($\rho_f^M=0,84$), поэтому на третьем этапе расчета оно также исключается из расчетной схемы. Далее разрушается нормальное сечение балки Б2 ($\rho_f^M=0,44$). После исключения этого сечения происходит неизбежное ($P_f^M=100\%$, $\rho_f^M=0$) разрушение нормального сечения балки Б5. Таким образом, процесс расчета может быть прекращен после проведения 4-х этапов, так как дальнейшее развитие разрушения не приносит поправок. Особенностью выполненного расчета является последовательное разрушение нормальных сечений балок Б4, Б3, Б2 и Б5. При этом не возникает катастрофических состояний в наклонных сечениях балок пролётного строения.

Таблица

Показатели риска разрушения сечений балок для всех этапов

Этапы	Показатели риска разрушения нормальных (ρ_f^M) и наклонных (ρ_f^O) сечений балок								
		Б1	Б2	Б3	Б4	Б5	Б6	Б7	Б8
Первый ($m=1$)	ρ_f^M	8,07	4,03	2,62	2,52	3,90	7,01	10,48	10,49
	ρ_f^O	7,89	4,57	3,41	3,27	4,92	7,94	10,45	10,62
Второй ($m=2$)	ρ_f^M	9,44	3,39	0,84	-	1,63	6,81	10,49	10,49
	ρ_f^O	7,02	3,55	2,86	6,50	3,58	5,61	8,82	10,18
Третий ($m=3$)	ρ_f^M	6,33	0,44	-	-	0,70	5,43	10,49	10,49
	ρ_f^O	5,85	2,64	6,68	6,98	2,49	4,93	8,67	10,39
Четвертый ($m=4$)	ρ_f^M	0,46	-	-	-	0,00	4,16	10,49	10,49
	ρ_f^O	3,20	6,44	7,54	6,07	1,82	4,52	9,09	10,44

Результаты выполненных расчетов используются при вычислении полной величины риска разрушения всей балочной системы по формуле (1). Графически изменение риска разрушения балочной системы в процессе поэтапных расчетов показано на рис. 9, где просматривается поддерживающее влияние расположенных рядом несущих балок. Окончательное значение вероятности разрушения пролетного строения составило $P_F=0,0001585$, что соответствует логарифмическому показателю риска $\rho_F=3,8$.

Результаты расчета по варианту Б показали, что предельные состояния возникают друг за другом в наклонных сечениях балок Б3,Б4,Б2 и Б5. При этом в нормальных сечениях этих балок они не возникают. Окончательная величина риска разрушения всей балочной системы по формуле (1) для рассматриваемого варианта составляет $P_F=0,000537$, что соответствует логарифмическому показателю риска $\rho_F=3,27$.

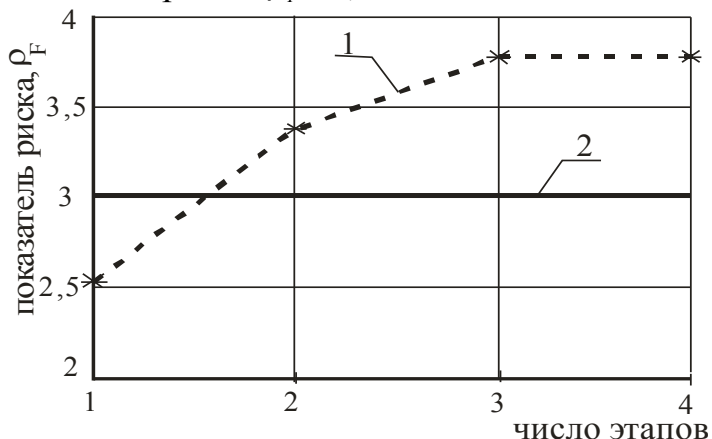


Рис. 9. Зависимость ρ_f от числа этапов расчета:
1 – результат расчета, 2 – допустимый уровень риска

Таким образом, с меньшим основанием, но также можно разрешить эксплуатацию мостового сооружения временными нормативными нагрузками А14.

В конце пятой главы диссертации приведены результаты расчетов риска раскрытия недопустимых трещин в нормальных сечениях балок средних пролетов моста через балку Сурки, которые выполнены из предварительно напряженных балок. Расчеты выполнены для нормативной нагрузки А11 и повышенной нагрузки А14.

Результаты выполненных расчетов показывают, что для рассматриваемого пролетного строения нормативные требования для проектной нормативной нагрузки А11 удовлетворяются ($\rho_F = 2,06 > 2,0$). В тоже время повышенная нагрузка А14 может вызвать недопустимые трещины ($\rho_F = 0,82$) и поэтому не может быть допущена при длительной эксплуатации.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1 Анализ исследований по применению теории надежности и теории риска для прочностных расчетов строительных конструкций показывает, что в практике проектирования они мало применяются, так как недостаточно разработаны и не имеют достаточной статистической базы для широкого использования.

2 Разработанная на положениях теории риска и нелинейной теории

железобетонных конструкций методика количественной оценки риска потери работоспособности применяемых в мостостроении систем железобетонных балок позволяет моделировать близкий к реальности процесс развития разрушения конструкции.

3 Усовершенствована методика количественной оценки риска возникновения катастрофического состояния в нормальных сечениях железобетонных балок для произвольных законов распределения прочностных характеристик материалов и действующих нагрузок.

4 Предложена методика количественной оценки риска возникновения катастрофического состояния в наклонных сечениях железобетонных балок для нормального распределения прочностных характеристик материалов и действующих нагрузок.

5 Выполненные численные исследования влияния разброса прочностных характеристик материалов на риски возникновения катастрофических состояний в нормальных и наклонных сечениях железобетонных балок выявили наиболее значимые факторы.

6 Предложена вычислительная схема оптимизации опалубочных размеров и армирования железобетонных балок при использовании в качестве целевой функции полной стоимости, включающей наряду со стоимостью ее изготовления и монтажа, также и зависящий от риска разрушения балки экономический ущерб.

7 Предложен и реализован алгоритм вероятностного расчета прочности и трещиностойкости нормальных сечений предварительно напряженных железобетонных балок. Выполненные численные исследования показали, что величина риска разрушения предварительно напряженных балок зависит в основном от разброса прочности напрягаемой арматуры, а флуктуация прочностных характеристик находящейся в сжатой зоне поперечного сечения ненапрягаемой арматуры и самого бетона балки почти не влияет на показатель риска. Выявлена зависимость параметров риска трещинообразования в балках как от разброса контролируемых усилий предварительного натяжения, так и от флуктуации их потерь.

8 Осуществленная апробация разработанной в диссертации программы RISK-RBS для вероятностной оценки работоспособности системы железобетонных балок показала на тестовом примере достоверность получаемых результатов. Результаты расчетов риска потери работоспособного состояния балочных систем на ряде примеров показали, что риск разрушения пролетного строения существенно меньше риска возникновения предельного состояния в одной балке.

9 Выполненные вероятностные расчеты для эксплуатируемого мостового сооружения позволяют принимать в качестве максимально допустимого уровня риска в расчетах на прочность логарифмический показатель риска, равный $|\rho_f|=3$, а на трещиностойкость и трещинообразование - $|\rho_f|=2$.

Основное положение диссертации опубликовано в следующих работах:

1 Сафронов В.С. Вероятностная оценка риска возникновения предельных состояний в сечениях изгибаемых железобетонных балок / В.С. Сафронов, Нгуен Динь Хоа // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. – Воронеж, 2010. – №. 1 (17). – С. 157–166. Лично автором выполнено 8 с.

2 Сафронов В.С. Вероятностная оценка риска возникновения предельных состояний в нормальных сечениях железобетонных балок / В.С. Сафронов, Нгуен Динь Хоа // Материалы международного конгресса: наука и инновации в строительстве – SIB - 2008. Том 3 «Оценка риска и безопасность в строительстве». – Воронеж, 2008. – С. 296–301. Лично автором выполнено 5 с.

3 Сафронов В.С. Вероятностная оценка риска разрушения по нормальному сечению железобетонных балок / В.С. Сафронов, Нгуен Динь Хоа // Сборник материалов IX международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии». – Тула, 2008. – С. 56–57. Лично автором выполнено 2 с.

4 Сафронов В.С. Вероятностная оценка риска возникновения предельных состояний в наклонных сечениях железобетонных балок [Электронный ресурс] / В.С. Сафронов, Нгуен Динь Хоа // Итоги 64-й всероссийской научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов университета с участием представителей исследовательских, проектно-конструкторских, строительных и общественных организаций «Инновации в сфере науки, образования и высоких технологий – Воронеж», - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см. - Систем. требования: ПК с процессором 486 +; Windows 95; дисковод CD-ROM; Adobe Acrobat Reader. Лично автором выполнено 2 с.

5 Сафронов В.С. Вероятностная оценка риска возникновения предельных состояний в наклонных сечениях железобетонных балок с учетом отгибов / В.С. Сафронов, Нгуен Динь Хоа // Сборник трудов международной конференции: Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики / ВГУ. – Воронеж, 2009. – С. 164–167. Лично автором выполнено 3 с.

Подписано в печать 24.05.2010. Формат 60 x 84 1/16.
Бумага писчая. Усл. печ. л. 1.1. Тираж 120 экз. Заказ № 265

Отпечатано: отдел оперативной полиграфии
Воронежского государственного архитектурно-строительного университета
394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84